第46卷 第9期
2023年9月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 9
Sep. 2023

黄河流域城市生态韧性与效率时空演化特征及协调发展分析

周 成[1]， 赵亚玲[1]， 张旭红[2]， 周 霖[3]， 任敏敏[1]

（1. 山西财经大学文化旅游与新闻艺术学院，山西 太原 030006；2. 西安理工大学经济与管理学院，陕西 西安 710054；3. 西北师范大学旅游学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：提升城市生态韧性和生态效率，促进二者间协同发展是实现黄河流域生态治理的重要目标。以黄河流域57个城市为研究靶区，运用加权求和法、SBM模型研究了2009—2018年黄河流域生态韧性与效率时空演化特征，并运用耦合协调模型分析了流域城市生态韧性与效率的协调发展关系。结果表明：(1) 2009—2018年，黄河流域城市生态韧性总体上处于波动下降态势，面临较大的生态威胁和环保压力。西安市、郑州市和济南市3个省会城市生态韧性较高，而固原市、定西市、海东市、吕梁市等城市韧性较低。(2) 黄河流域城市生态效率呈先降后升高的"U"形演化特征。定西市、陇南市、庆阳市、鄂尔多斯市、固原市和洛阳市为生态效率高等类型，生态效率低等类型主要位于中、下游的山西省、河南省和山东省内的城市。(3) 生态韧性与效率协调关系与生态效率子系统相似，由不断下滑转向逐步回升。良好协调、中度协调型城市数量有所增加，勉强协调型城市有所减少，黄河流域城市生态韧性与效率协调发展势头显现，但短期内经济发展与环境保护间的矛盾仍较突出。研究结果可为黄河流域城市生态政策制定、生态韧性和效率提高提供理论参考。

关 键 词：生态韧性；生态效率；协调发展；城市；黄河流域

文章编号：1000-6060(2023)09-1514-10(1514~1523)

生态韧性是生态系统吸收外界干扰、自身系统重组及持续性发展的能力，主要由抵抗力和恢复力两方面构成[1]。生态效率则侧重于生态系统发展过程中表现出的最小生态损耗及最大产出效应[2]，生态韧性与效率之间存在协调发展关系[3]，二者均是区域生态系统发展的重要目标。一方面，通过强化生态环境的外部抵抗力与内部恢复力，可降低单位资源损耗与环境污染，进而为区域生态效率的提高提供基础条件[4]。另一方面，生态效率发展主要是基于生态期望产出提高与生态要素投入降低，这既是区域经济科技化与产业绿色化过程，也可为区域生态韧性的增强提供支持与保障[5]。近年来，随着生态文明建设的推进以及节能环保技术的升级，我国生态资源产出能力不断增强，资源利用、工业投资与科技发展等均朝着附加值最大化和资源耗费最小化方向发展。但与此同时，一些地区及河流流域一方面在增加生态产出、提高经济效率，另一方面也造成资源消耗巨大、环境污染严重等问题，使当地生态环境韧性受损。黄河流域是我国重要的生态屏障，生态系统复杂多样[6]，又是重要的"能源流域"和工矿企业集聚区，生态保护形势严峻[7]。2019年后，黄河流域生态保护和高质量发展正式上升成为重大国家战略，为流域生态治理带来重大机遇。黄河流域生态韧性与效率发展处于何种水平？二者间呈现怎样的协调发展关系？回答这些问题，将为推动黄河流域生态保护和高质量发展切实提供理论依据。

"韧性"一词最初源于工程学领域，后作为一种

收稿日期：2022-12-01； **修订日期**：2022-12-31

基金项目：教育部人文社会科学基金项目(20YJC890050)；山西省高等学校哲学社会科学研究项目(2021W048)；山西省高等学校教学改革创新项目(J2021298)；山西社会主义学院2023年度科研课题(sxsyzbkt093)资助

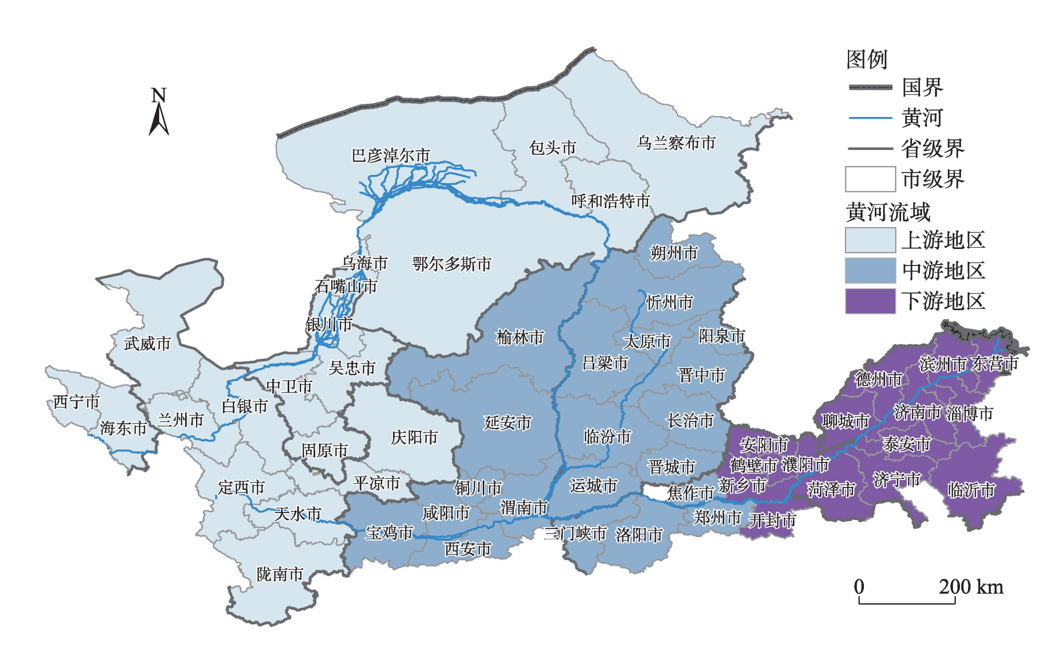
作者简介：周成(1989-)，男，博士，副教授，主要从事黄河流域经济地理研究. E-mail: zhoutravel@163.com

通讯作者：张旭红(1996-)，女，博士研究生，主要从事黄河流域经济地理研究. E-mail: zxhhao85@163.com

具有演化动态性和非线性研究范式受到了经济、社会、环境等领域学者的广泛关注[8]。美国学者Holling最早提出生态韧性概念，认为生态韧性是自然系统在面对自然或人为原因引起的生态变化所能够承受或吸收的扰动程度[9]。当前，国外生态韧性相关研究主要围绕理论构建[10]、形成机理[11]、对策路径[12]等内容展开，国内研究则主要涉及韧性表现[13]、发展特征[14]与评价测度[15-16]等内容。如臧鑫宇等[17]认为生态韧性包括抵抗力和恢复力两方面表现形式。沈洁等[18]则指出生态韧性具有防御能力、响应能力和学习能力等几大发展特征。此外，学者们借助社会网络分析[19]、遥感影像技术[20]、耦合协调模型[21]等方法对不同区域生态韧性进行了量化测度。国内外关于生态效率的研究则较为成熟。其中，对生态效率的评价测度涉及到企业[22]、行业[23]及区域[24]等多个层面。测度方法包括单一比值法、多指标体系法[25]、生态足迹法[26]及DEA拓展模型[27]等。单一比值法指标无法体现不同环境下生态效率的差异[28]。多指标体系法虽能较多地考虑相关影响因素，但囿于指标赋权方法差异，使得该方法应该范围狭窄[29]。DEA拓展模型基于指标选取全面、非主观赋权等优点，已成为当下生态效率测度的主流工具之一。如赵哲等[30]运用超效率DEA模型并结合Malmquist指数分析了2001—2015年呼伦贝尔各旗县的生态效率时空差异；Moutinho等[31]基于两阶段DEA模型测算了欧盟27个国家的生态效率演变特征。由上可知，当前生态韧性与效率研究仍多局限于各自维度之内，缺乏两者间协调发展关系的探究。研究对象多以我国省域和全国层面为主，对大流域、跨省区及城市间的综合测度相对较少。本研究以黄河流域57个城市为研究靶区，借助加权求和法和SBM模型对其生态韧性与效率的时空演化特征给予研究。进一步，引入耦合协调模型探究其生态韧性与效率的协调发展关系，以期为黄河流域生态保护和高质量发展提供理论依据。

1　研究区概况

黄河由西向东流经青海省、四川省、甘肃省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区、陕西省、山西省、河南省和山东省，全长约5464 km。黄河流域作为连接三江源、祁连山、汾渭平原、华北平原等“生态高地”的巨型生态廊道，在我国生态建设中具有重要地位。本研究所选的黄河流域城市以《黄河文化百科全书》所录的66个地级市为依据，其中阿坝羌族、临夏回族、甘南藏族、海北藏族、黄南藏族、海南藏族、果洛藏族、玉树藏族和海西蒙古族藏族等自治州数据缺失较多，予以剔除，将剩余57个地级市作为本研究案例靶区(图1)。此外，参照水利部黄河



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3333号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1　研究区概况

Fig. 1　Overview of the study area

水利委员会标准，将以上城市划分为上、中、下游3个区域，其中，上游区域从西宁市到呼和浩特市，中游区域从呼和浩特市到郑州市，下游区域从郑州市到东营市。

2 数据与方法

2.1 数据来源

数据主要源于《中国城市统计年鉴(2010—2019年)》《中国能源统计年鉴(2010—2019年)》及相关城市《国民经济与社会发展统计公报》。对于查阅资料后仍无法获取指标，采用趋势外推法给予赋值处理。其中，个别指标为加工后数据，包括人均绿地面积(城市绿地面积与年末总人口比值)、万元GDP能耗量(能源消费总量与GDP比值)以及万元GDP水耗量(供水总量与GDP比值)、万元GDP电耗量(全社会用电量与GDP比值)。

2.2 研究方法

2.2.1 加权求和法 本研究采用加权求和法对黄河流域城市的生态韧性给予分析。首先需对原始数据进行极值标准化预处理，其次通过熵值法对指标进行赋权，最后运用加权求和法计算各城市生态韧性的综合评价值。计算公式如下：

$$Y_i = \sum_{j=1}^{m} \lambda_j \times x'_{ij} \tag{1}$$

式中：x'_{ij} 为第 i 个研究单元中第 j 项指标的标准化值；λ_j 为第 j 项指标的权重；Y_i 为第 i 个研究单元的生态韧性值。

2.2.2 SBM模型 Tone[32]提出基于松弛变量的非径向、非角度SBM模型，该模型不仅包含投入产出变量的等比例改进，还能有效处理非期望产出，进而提高了测度准确性。本研究采用SBM模型测度黄河流域城市的生态效率值。计算公式如下

$$E = \min \frac{1 - \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} S_n^x / x_{k'n}^{t'}}{1 + \frac{1}{M+I}\left(\sum_{m=1}^{M} S_m^y / y_{k'm}^{t'} + \sum_{i=1}^{I} S_i^b / b_{k'i}^{t'}\right)} \tag{2}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases} \sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} z_k^t x_{kn}^t + s_n^x = x_{k'n}^{t'} \ (n = 1, 2, \cdots, N) \\ \sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} z_k^t y_{km}^t - s_m^y = y_{k'm}^{t'} \ (m = 1, 2, \cdots, M) \\ \sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} z_k^t b_{ki}^t - s_i^b = b_{k'i}^{t'} \ (i = 1, 2, \cdots, I) \\ z_k^t \geqslant 0,\ s_n^x \geqslant 0,\ s_m^y \geqslant 0,\ s_i^b \geqslant 0 \ (k = 1, 2, \cdots, K) \end{cases} \tag{3}$$

式中：E 为生态效率值；N、M、I 分别为投入、期望产出、非期望产出指标数；s_n^x、s_m^y、s_i^b 分别为投入、期望产出和非期望产出的松弛向量；x_{kn}^t、y_{km}^t、b_{ki}^t 分别为第 k 个生产单元在 t 时期的投入、期望产出和非期望产出值；$x_{k'n}^{t'}$、$y_{k'm}^{t'}$、$b_{k'i}^{t'}$ 分别为第 k' 个生产单元在 t' 时期的投入、期望产出和非期望产出值；z_k^t 为权重向量。且 $0<E\leqslant 1$；E 值越大，表明生态效率越高；当 $E=1$ 时，生产单元达到完全有效。

2.2.3 耦合协调模型 耦合指不同系统通过相互作用彼此影响的过程。协调则为系统间相互配合、良性循环的发展关系。本研究采用耦合协调模型来分析黄河流域城市生态韧性与效率两子系统协调发展程度[20]。计算公式如下：

$$C = \sqrt{\frac{Y_i \times E}{\left[(Y_i + E)/2\right]^2}} \tag{4}$$

$$D = \sqrt{C \times T} \tag{5}$$

$$T = \alpha Y_i + \beta E \tag{6}$$

式中：Y_i、E 分别为生态韧性与效率值；C 为两子系统的耦合度；D 为两子系统的耦合协调度；T 为两子系统综合发展评价值；考虑到生态韧性与效率在生态建设中同等重要，故将 α、β 值均设为0.5。

2.3 生态韧性与效率协调发展评价体系构建

在遵循客观性、独立性与可操作性原则下，本研究构建出2个子系统、22个具体指标构成的黄河流域生态韧性与效率协调发展评价体系(表1)。

生态韧性子系统主要借鉴了经济[3-8]、城市[13-14]与环境韧性[15-17]相关成果，将其细分为抵抗力和恢复力2个维度。其中，抵抗力表示生态系统通过主动抵御环境干扰，使之不会突破自身稳定状态的临界值而受到损坏的能力[3]，地区经济发展、社会基础是影响生态抵抗力的主要因素。恢复力则侧重于当环境干扰超过生态系统所能承受的临界值后，生态恢复至稳定状态的能力[17]，恢复力主要受生态重建、污染治理等因素影响。

生态效率子系统则主要参考了能源、工业等生态效率[26-30]相关文献，将其分为投入度和产出度2个维度。其中，投入度指生态系统为区域社会经济提供服务所消耗的资源和能源，以及在此过程中社会资金和劳动力等投入指标[25]。产出度侧重于生态系统为满足人类生活所提供的产品和服务价值[29-30]，主要涉及期望产出和非期望产出两方面。

表1 黄河流域城市生态韧性与效率协调发展评价体系

Tab. 1 Evaluation system for the coordinated development of urban ecological resilience and efficiency in the Yellow River Basin

子系统	维度	子维度	具体指标	单位	方向
生态韧性	抵抗力	经济能力	二三产业占GDP比重	%	+
			人均GDP	元	+
			每万人实际外商直接投资	10^4 USD	+
		社会能力	人口自然增长率	‰	+
			科学技术支出占一般预算支出比	%	+
			高等学校在校生人数	%	+
			每万人医生数	人	+
	恢复力	生态建设	建成区绿化面积	hm^2	+
			建成区绿化覆盖率	%	+
			人均绿地面积	hm^2	+
		污染治理	工业废物综合利用率	%	+
			污水处理厂集中处理率	%	+
			生活垃圾无害化处理率	%	+
生态效率	投入度	资本性投入	固定资产投资	10^4元	+
		劳动力投入	从业人员数	10^4人	+
		资源投入	万元GDP能耗量	m^3	-
			万元GDP水耗量	m^3	-
			万元GDP电耗量	kW·h	-
	产出度	期望产出	地区生产总值	10^4元	+
		非期望产出	工业废水排放量	10^4 t	-
			工业SO_2排放量	t	-
			工业粉尘排放量	t	-

注:+、-分别表示指标正、负方向。

3 结果与分析

3.1 黄河流域城市生态韧性的时空演变特征

如图2所示，黄河流域城市生态韧性在2009—2018年总体处于波动下降趋势，由2009年0.239下降到2018年0.206，流域面临较大的生态威胁与环保压力，这也是2019年黄河流域生态保护和高质量发展国家战略提出的宏观背景与客观要求。2008年后受全球金融危机及国内经济形势影响，流域沿线多个城市为追求经济规模和发展速度致力于基建投入和项目上马，使得流域内生态环境韧性有所下降。2015年后中共中央、国务院相继颁布《国家新型城镇化规划》《生态文明体制改革总体方案》等政策，相关城市社会经济更多考虑了生态环保因素，生态文明建设也取得了较大成效，韧性降幅减缓并在部分年份呈上升态势。从上、中、下游看，生态韧性由高到低为下游区域>上游区域>中游区域。下游地区城市社会经济基础较好，生态环境受外界因素威胁时抵抗力较强，其生态韧性值较高；上游地区生态环境虽较脆弱，但环保力度和资金投入较大，生态韧性次之；黄河中游是我国典型的生态脆弱区、自然灾害频发区及重化工能源区，

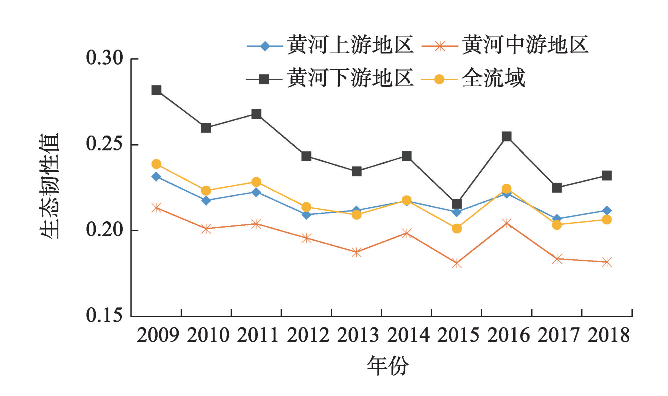


图2 黄河流域城市生态韧性演变趋势

Fig. 2 Evolution trend of urban ecological resilience in the Yellow River Basin

社会经济和生态环境矛盾突出，生态韧性值也较低。

对黄河流域城市2009—2018年生态韧性均值进行计算，并以0.1、0.3、0.5为阈值将生态韧性分为高等、较高、较低和低等4个类型。由图3可知，生态韧性高等类型有西安市、郑州市和济南市3个省会城市，以上城市经济社会基础良好，近年来高度重视产业转型与生态保护，其生态韧性与流域其他城市相比具有绝对优势。此外，东营市、淄博市、呼和浩特市、包头市、鄂尔多斯市、乌海市、银川市、石嘴山市、兰州市9个城市为生态韧性较高类型，以上多为省会及周边城市，其生态环境抵抗力和恢复力具有保障。运城市、固原市、晋中市、海东市、吕梁市、临汾市、忻州市等城市属于生态韧性低等类型，其中运城市、晋中市、吕梁市所属的山西省为我国重要能源化工基地，自然环境受外界影响较大，生态韧性受损严重。固原市、海东市和定西市气候干旱少雨、蒸发剧烈，加之人为不合理的垦、牧、伐、占等现象严重，使其生态韧性降低。

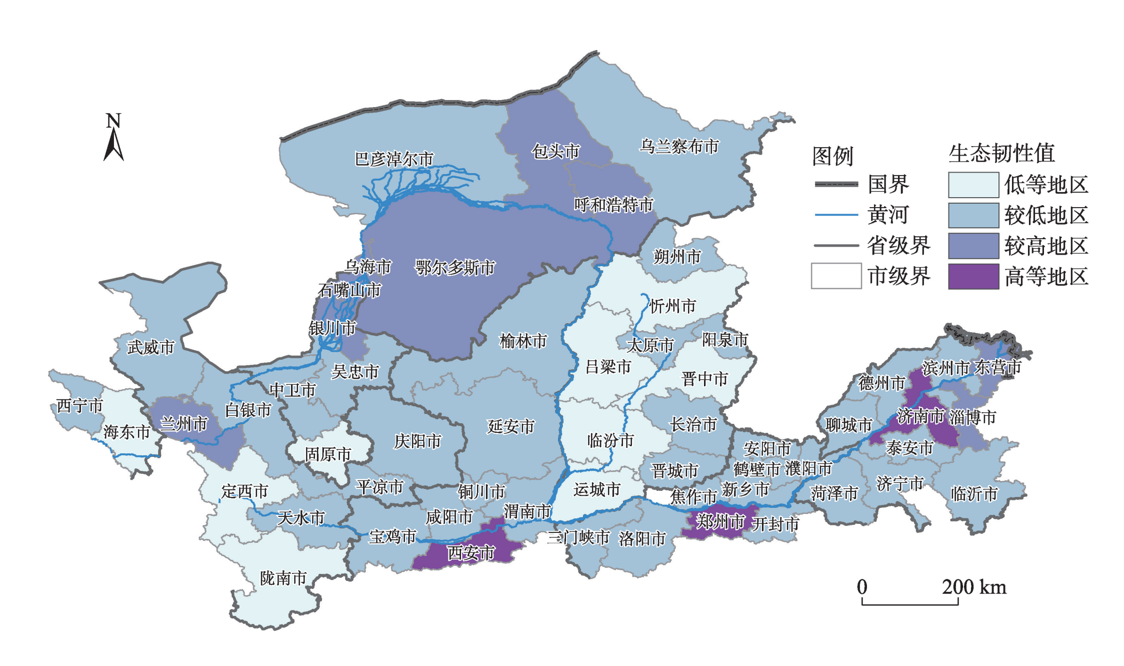


图3 黄河流域城市生态韧性空间差异

Fig. 3 Spatial difference of urban ecological resilience in the Yellow River Basin

3.2 黄河流域城市生态效率的时空演变特征

黄河流域城市生态效率发展总体上呈现“U”形演变特征，即2009—2015年生态效率值由0.332下降到0.256，2015年之后效率由低转高，从0.256上升到0.435（图4）。2015年前，沿线城市经济发展侧重于资源、环境等要素投入，能源化工等传统工业在产业结构中占主导性地位，生态效率较低且呈下降趋势。2015年后“十三五”期间，沿线城市产业转型升级加快，传统高耗能、高污染、高排放的经济模式向集约型、高质量发展方向转变，黄河流域生态效率不断提升。从黄河上、中、下游看（图5），上游区域生态效率值较高，中游次之，而下游最低。长期以来，黄河上游高度重视生态维护与环境治理，生态非期望产出处于较低水平，生态效率值与中、下游相比较高。中、下游城市社会经济基础良好，但前期经济建设中对环境的损耗较严重，导致其生态效率值较低。值得注意的是，近年来下游区域积

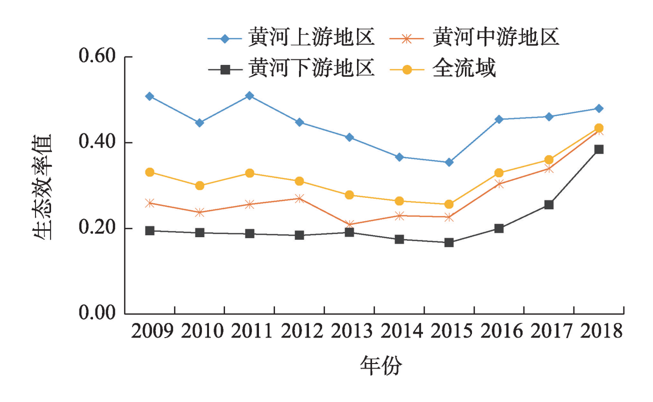


图4 黄河流域城市生态效率演变趋势

Fig. 4 Evolution trend of urban eco-efficiency in the Yellow River Basin

极推进新旧动能转换、产业腾笼换鸟，其生态效率呈快速上升态势。

从生态效率的城市间差异看(图5)，定西市、陇南市、庆阳市、鄂尔多斯市、固原市和洛阳市6个城市为生态效率高等类型，以上城市在多个年份生态效率值均为1，即实现了生产单元有效。此外，海东市、武威市、中卫市、天水市为生态效率较高城市，这主要是由生态非期望产出较低所致。除个别城市之外，生态效率高等与较高等级类型均位于黄河上游区域。而生态效率低等类型城市则主要位于黄河中、下游的山西省、河南省和山东省，这与前述生态效率在黄河上、中、下游的区域差异结果相印证。具体而言，生态效率低等类型城市包括山西省的太原市、晋中市、长治市和晋城市，河南省的焦作市、郑州市、新市乡和安阳市以及山东省的聊城市、德州市、滨州市、淄博市和临沂市等，以上城市经济发展资源型路径依赖较强，生态投入高而期望产出低，因而其生态效率处于低位，亟需从转变经济增长

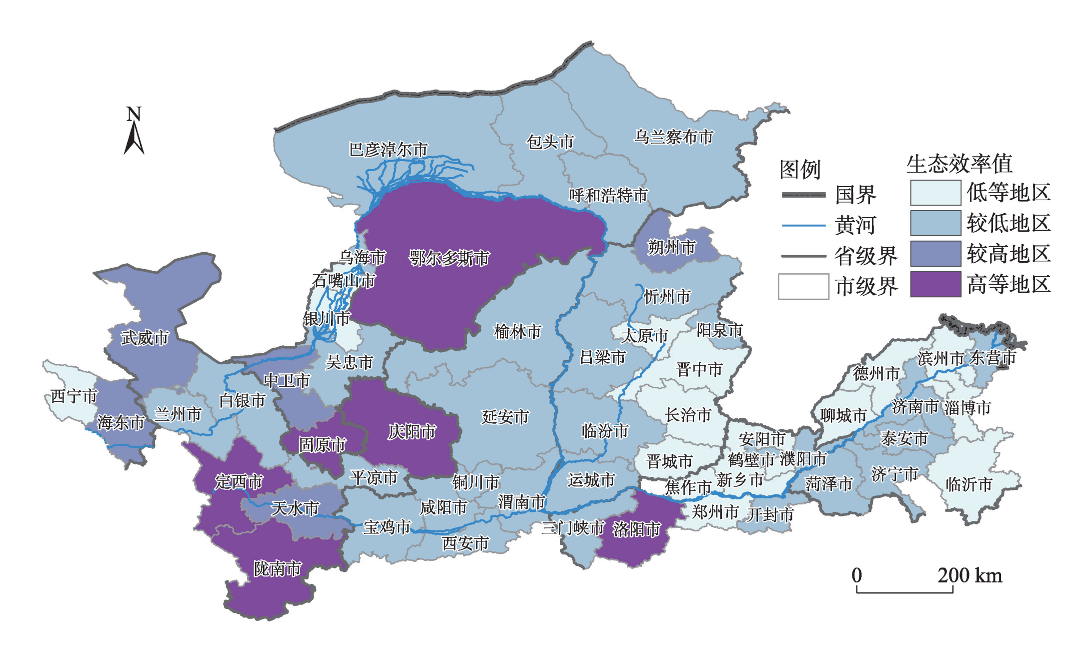


图5 黄河流域城市生态效率空间差异

Fig. 5 Spatial difference of urban eco-efficiency in the Yellow River Basin

方式、注重生态环境治理等方面来提升其生态效率。

3.3 生态韧性与效率协调发展分析

黄河流域城市2009—2018年生态韧性与效率的协调发展态势与生态效率子系统相似，由不断下滑转向逐步回升(图6)。2009—2015年协调指数由0.480下降至0.440，到2018年时两子系统的耦合协调指数又回升至0.495，这表明2015年以后流域城市韧性与效率协调发展不断增强。近年来，黄河沿线城市不仅注重发展技术密集、环境友好型产业，还积极出台环保政策、法规，持续推进流域生态文明建设，使得两者间协调性有大幅提升。从黄河上、中、下游来看，两子系统的协调指数由高到低依次为上游区域>下游区域>中游区域。中、下游区域协调指数虽低于流域整体均值，但近几年基于生态改善和效率提升等原因，其效率与韧性间协调程度呈上升趋势。上游区域协调指数虽高于流域整体均值，但随着上游城市工业化进程的加快，其韧性与效率协调指数显现下降趋势，这应当引起足够重视。

为动态了解黄河流域各城市生态韧性与效率

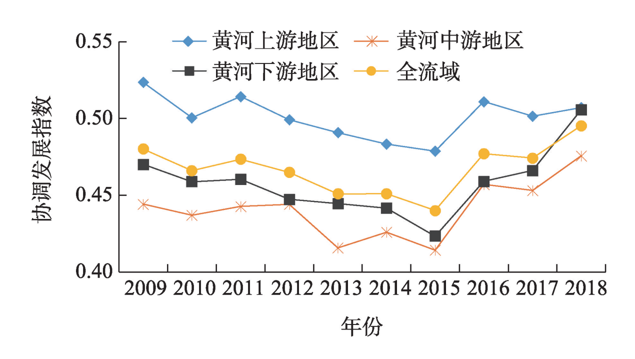


图6 黄河流域城市生态韧性与效率协调发展关系的演变趋势

Fig. 6 Evolution trend of coordinated development between urban ecological resilience and efficiency in the Yellow River Basin

协调发展空间差异，以研究时段起止年份（2009年和2018年）为例，对两子系统的耦合协调指数进行图形呈现。由图7可知，黄河流域生态韧性与效率间良好协调、中度协调型城市数量有所增加。其中，良好协调型从2009年的0个增加到2018年的西安市和济南市2个（图7a），以上城市由于经济结构优化和生态治理显著，生态韧性与效率均有提升且二者间协调性不断增强。中度协调型则由2009年6个增加到2018年7个，除去济南市和呼和浩特市之外，其余中度协调城市在研究时段均有所变化，这反映了黄河流域生态韧性与效率中度协调型城市具有较大的变动性。进一步，勉强协调型的城市由45个减少到38个，中度失调型城市有由6个增加到了10个（图7b），黄河流域生态治理是一个漫长且艰巨的过程，生态韧性与效率间协调发展势头不断显现，但短期来看经济发展与环境保护之间矛盾仍较为突出，山西省的吕梁市、长治市、晋城市和运城市以及河南省的安阳市、山东省的聊城市由2009年的勉强协调性降低为2018年的中度失调型，以上城市应通过降低生态污染、促进产业升级等方式来增强生态韧性与效率协调关系。

4 讨 论

黄河流域作为我国重要的生态安全屏障、能源化工基地及经济发展地区，在国家生态文明建设和社会经济发展中具有举足轻重的地位。近年来，黄

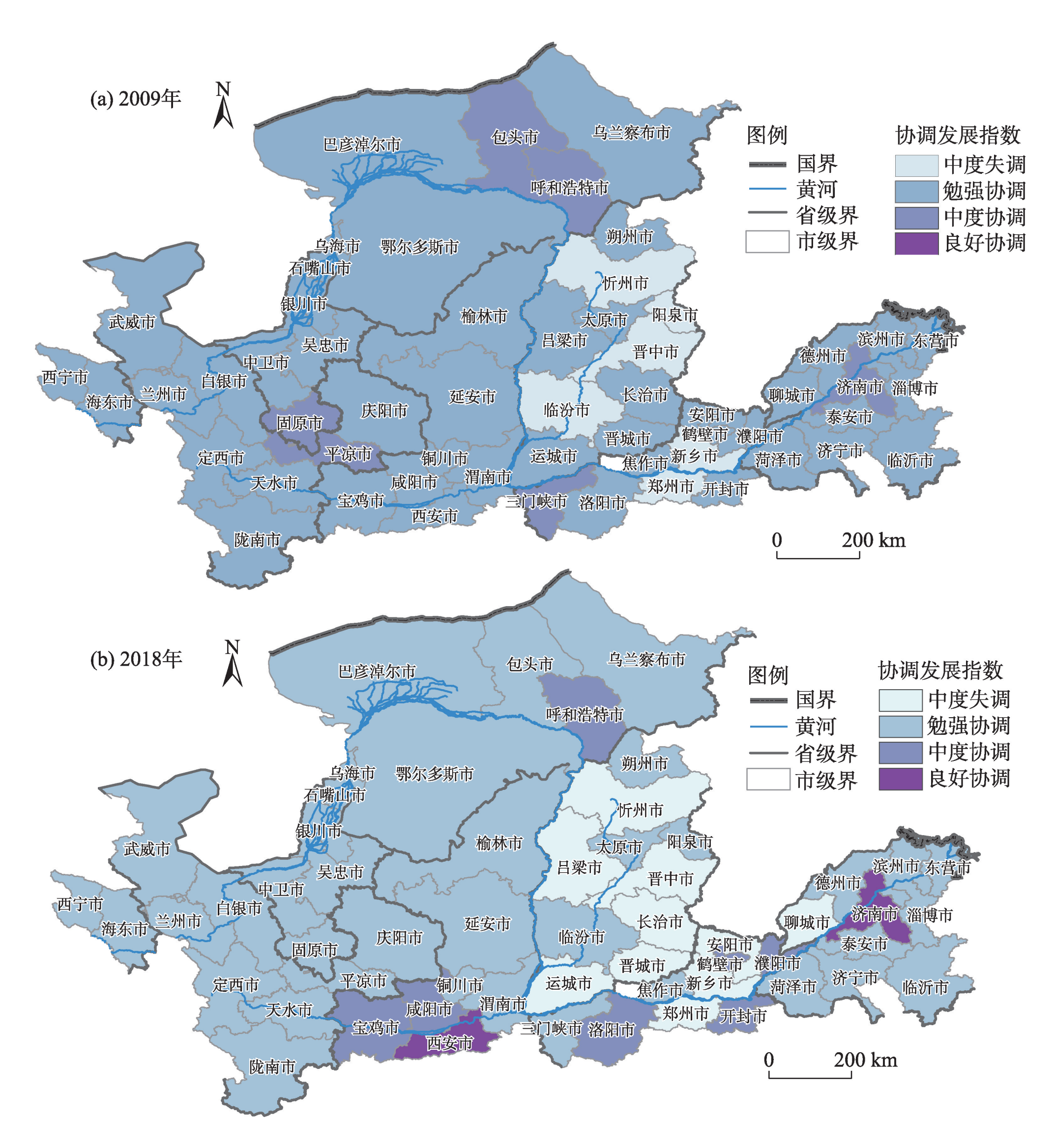


图7 黄河流域城市生态韧性与效率协调发展空间差

Fig. 7 Spatial difference of coordinated development between urban ecological resilience and efficiency in the Yellow River Basin

河流域生态环境保护和高质量发展已与京津冀协同发展、长江经济带、长江三角洲区域一体化、大湾区建设等一道上升成为了国家重大战略，这为流域内生态治理和环境保护带来了重大机遇。本研究对黄河流域城市的生态韧性分析与李连刚等[3]、张筱娟等[33]研究结论相一致，流域城市亟需采取产业升级、动能转换和生态保护等措施以扭转生态韧性总体下降的态势[15]。生态效率所得结论与陈明华等[4]研究具有一定差异，主要是两研究在效率评价体系与效率测度时段的不同所导致。本研究主要贡献是把生态韧性与效率置于同一分析框架之中，通过分析黄河流域城市生态韧性与效率的演化特征和协调关系，一定程度上拓展了当前生态韧性相关研究视角与案例应用。

与此同时，本研究也存在如下不足。其一，在体系构建中，生态韧性重点关注了人类活动对生态环境的影响，对土地类型、气候变化和生物多样性等自然因素则考量较少，未来可加入更多自然环境相关变量以构建更为全面的协调发展评价体系。其二，在研究时段上，受限于数据可得性和统一口径等原因，仅将研究时段限定于2009—2018年，即黄河流域生态保护和高质量发展战略提出之前。未来可在更新数据的基础上，探寻黄河流域战略提出后流域城市生态韧性与效率的演化趋势及内在规律。

5 结 论

（1）2009—2018年，黄河流域城市生态韧性总体上处于波动下降趋势，流域面临较大的生态威胁和环保压力。下游区域生态保护相对良好且韧性较高，上游次之，而中游区域韧性值较低。此外，西安市、郑州市和济南市3个省会城市生态韧性具有优势，而固原市、定西市、海东市、吕梁市等城市生态韧性值较低。

（2）黄河流域城市生态效率在2009—2018年呈现"U"形演化特征，即2009—2015年生态效率由0.332下降到0.256，2015年后效率值由低转高。此外，上游地区生态效率值较高、中游次之、下游最低。城市差异看，定西市、陇南市、庆阳市、鄂尔多斯市、固原市和洛阳市6个城市为生态效率高等类型，多数城市位于黄河上游区域，生态效率低等类型城市主要位于山西省、河南省和山东省等流域中、下游省区。

（3）黄河流域城市生态韧性与效率协调关系与生态效率子系统相似，由下滑转向回升。2015年后，沿线城市不仅注重发展技术密集、环境友好型产业，还持续推进流域生态文明建设。此外，2009—2018年生态韧性与效率良好协调、中度协调型城市有所增加，勉强协调型城市有所减少，生态韧性与效率间协调发展势头不断显现，但短期来看其经济发展与环境保护间矛盾仍较为突出。

参考文献(References)

[1] 陶洁怡, 董平, 陆玉麒. 长三角地区生态韧性时空变化及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(9): 1975-1987. [Tao Jieyi, Dong Ping, Lu Yuqi. Spatial-temporal analysis and influencing factors of ecological resilience in Yangtze River Delta[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(9): 1975-1987.]

[2] 任梅, 王小敏, 刘忠梅, 等. 中国区域生态效率时空变化及其影响因素分析[J]. 华东经济管理, 2019, 33(9): 71-79. [Ren Mei, Wang Xiaomin, Liu Zhongmei, et al. Analysis on spatial-temporal change and the influencing factors of regional eco-efficiency of China[J]. East China Economic Management, 2019, 33(9): 71-79.]

[3] 李连刚, 张平宇, 程钰, 等. 黄河流域经济韧性时空演变与影响因素研究[J]. 地理科学, 2022, 42(4): 557-567. [Li Liangang, Zhang Pingyu, Cheng Yu, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of economic resilience in the Yellow River Basin[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(4): 557-567.]

[4] 陈明华, 岳海珺, 郝云飞, 等. 黄河流域生态效率的空间差异、动态演进及驱动因素[J]. 数量经济技术经济研究, 2021, 38(9): 25-44. [Chen Minghua, Yue Haijun, Hao Yunfei, et al. The spatial disparity, dynamic evolution and driving factors of ecological efficiency in the Yellow River Basin[J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2021, 38(9): 25-44.]

[5] 李雪铭, 刘凯强, 田深圳, 等. 基于DPSIR模型的城市人居环境韧性评价——以长三角城市群为例[J]. 人文地理, 2022, 37(1): 54-62. [Li Xueming, Liu Kaiqiang, Tian Shenzhen, et al. Evaluation of urban human settlements resilience based on DPSIR model: A case study of the Yangtze River Delta Urban Systems[J]. Human Geography, 2022, 37(1): 54-62.]

[6] 周成, 张旭红, 张倩, 等. 黄河流域"五位一体"综合评价体系建构与空间差异研究[J]. 中国沙漠, 2021, 41(4): 1-11. [Zhou Cheng, Zhang Xuhong, Zhang Qian, et al. The construction of "Five in One" comprehensive evaluation system and spatial difference in the Yellow River Basin[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(4): 1-11.]

[7] 中共中央, 国务院. 黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要[N]. 人民日报, 2021-10-09(01). [Central Committee of Commu-

nist Party of China, the State Council of the People's Republic of China. Outline of the planning for ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin[N]. People's Daily, 2021-10-09(01).]
[8] 孙久文, 孙翔宇. 区域经济韧性研究进展和在中国应用的探索[J]. 经济地理, 2017, 37(10): 1-9. [Sun Jiuwen, Sun Xiangyu. Research progress of regional economic resilience and exploration of its application in China[J]. Economic Geography, 2017, 37(10): 1-9.]
[9] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology & Systematics, 1973, 4(1): 1-23.
[10] Delettre O. Identity of ecological systems and the meaning of resilience[J]. Journal of Ecology, 2021, 109(9): 3147-3156.
[11] Berkes F, Jolly D. Adapting to climate change: Social-ecological resilience in a Canadian western arctic community[J]. Ecology and Society, 2000, 5(2): 213-218.
[12] Lebel L. Governance and the capacity to manage resilience in regional social-ecological systems[J]. Ecology & Society, 2006, 11(1): 230-250.
[13] 王松茂, 牛金兰. 山东半岛城市群城市生态韧性的动态演化及障碍因子分析[J]. 经济地理, 2022, 42(8): 51-61. [Wang Songmao, Niu Jinlan. Dynamic evolution and obstacle factors of urban ecological resilience in Shandong Peninsula urban agglomeration[J]. Economic Geography, 2022, 42(8): 51-61.]
[14] 夏楚瑜, 董照樱子, 陈彬. 城市生态韧性时空变化及情景模拟研究——以杭州市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 116-126. [Xia Chuyu, Dong Zhaoyingzi, Chen Bin. Spatio-temporal analysis and simulation of urban ecological resilience: A case study of Hangzhou[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 116-126.]
[15] 杨晓冬, 李紫薇, 张家玉, 等. 可持续发展视角下城市韧性的时空评价[J]. 城市问题, 2021, 40(3): 29-37. [Yang Xiaodong, Li Ziwei, Zhang Jiayu, et al. Spatiotemporal evaluation of urban resilience from the perspective of sustainable development[J]. Urban Problems, 2021, 40(3): 29-37.]
[16] 朱金鹤, 孙红雪. 中国三大城市群城市韧性时空演进与影响因素研究[J]. 软科学, 2020, 34(2): 72-79. [Zhu Jinhe, Sun Hongxue. Research on spatial-temporal evolution and influencing factors of urban resilience of China's three metropolitan agglomerations[J]. Soft Science, 2020, 34(2): 72-79.]
[17] 臧鑫宇, 焦娇, 王峤. 既有城区生态韧性问题解析与空间优化策略研究[J]. 城市建筑, 2019, 16(15): 34-38. [Zang Xinyu, Jiao Jiao, Wang Qiao. Study on the problem of ecological resilience in the existing urban areas and the strategy of spatial optimization[J]. Urbanism and Architecture, 2019, 16(15): 34-38.]
[18] 沈洁, 李燕, 夏春红, 等. 云南省城市生态韧性测度及时空演变研究[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(2): 55-58. [Shen Jie, Li Yan, Xia Chunhong, et al. Study on the measure and spatial evolution of urban ecological resilience in Yunnan[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39(2): 55-58.]
[19] 路兰, 周宏伟, 许清清. 多维关联网络视角下城市韧性的综合评价应用研究[J]. 城市问题, 2020(8): 42-55. [Lu Lan, Zhou Hongwei, Xu Qingqing. Application research on comprehensive evaluation of urban resilience from the perspective of multidimensional relational networks[J]. Urban Problems, 2020(8): 42-55.]
[20] 李苏, 刘浩南. 干旱区城市化与生态韧性耦合协调的时空格局演化分析——以宁夏为例[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1281-1290. [Li Su, Liu Haonan. Spatio-temporal pattern evolution of coupling coordination between urbanization and ecological resilience in arid region: A case of Ningxia Hui Autonomous Region[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1281-1290.]
[21] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 等. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究[J]. 地理学报, 2021, 76(4): 973-991. [Wang Shaojian, Cui Zitian, Lin Jingjie, et al. Coupling relationship between urbanization and ecological resilience in the Pearl River Delta[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(4): 973-991.]
[22] Côté R, Booth A, Louis B. Eco-efficiency and SMEs in Nova Scotia, Canada[J]. Journal of Cleaner Production, 2006, 14(7): 542-550.
[23] Kharel G P, Charmondusit K. Eco-efficiency evaluation of iron rod industry in Nepal[J]. Journal of Cleaner Production, 2008, 16(13): 1379-1387.
[24] Wang S J, Cui Z T, Lin J J, et al. The coupling relationship between urbanization and ecological resilience in the Pearl River Delta[J]. Journal of Geographical Sciences, 2022, 32(1): 44-64.
[25] 付丽娜, 陈晓红, 冷智花. 基于超效率DEA模型的城市群生态效率研究——以长株潭"3+5"城市群为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(4): 169-175. [Fu Lina, Chen Xiaohong, Leng Zhihua. Urban agglomerations eco-efficiency analysis based on super-efficiency DEA model: Case study of Chang-Zhu-Tan "3+5" urban agglomeration[J]. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(4): 169-175.]
[26] 史丹, 王俊杰. 基于生态足迹的中国生态压力与生态效率测度与评价[J]. 中国工业经济, 2016, 33(5): 5-21. [Shi Dan, Wang Junjie. Measurement and evaluation of China's ecological pressure and ecological efficiency based on ecological footprint[J]. China Industrial Economics, 2016, 33(5): 5-21.]
[27] Moutinho V, Fuinhas J A, Marques A C, et al. Assessing eco-efficiency through the DEA analysis and decoupling index in the Latin America countries[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 205: 512-524.
[28] Wang X M, Ding H, Liu L. Eco-efficiency measurement of industrial sectors in China: A hybrid super-efficiency DEA analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 229: 53-64.
[29] 倪颖, 文传浩. 生态效率测度方法及应用研究综述[J]. 贵州商学院学报, 2019, 32(1): 73-78. [Ni Ying, Wen Chuanhao. A summary of research on ecological efficiency measurement methods and applications[J]. Journal of Guizhou University of Commerce, 2019, 32(1): 73-78.]
[30] 赵哲, 白羽萍, 胡兆民, 等. 基于超效率DEA的呼伦贝尔地区草牧业生态效率评价及影响因素分析[J]. 生态学报, 2018, 38

(22): 7968−7978. [Zhao Zhe, Bai Yuping, Hu Zhaomin, et al. Evaluation of ecological efficiency and factors influencing grassland animal husbandry in the Hulunbuir region based on a super-efficiency DEA model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(22): 7968−7978.]

[31] Moutinho V, Madaleno M, Robaina M. The economic and environmental efficiency assessment in EU cross-country: Evidence from DEA and quantile regression approach[J]. Ecological Indicators, 2017, 78(7): 85−97.

[32] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130 (3): 498−509.

[33] 张筱娟, 汤琪凤, 张镇. 黄河流域城市韧性空间分异特征及其影响因素识别[J]. 地域研究与开发, 2022, 41(6): 48−54. [Zhang Xiaojuan, Tang Qifeng, Zhang Zhen. Spatial differentiation characteristics and its influencing factors of urban resilience in the Yellow River Basin[J]. Areal Research and Development, 2022, 41(6): 48−54.]

Spatiotemporal evolutionary characteristics and coordinated development of urban ecological resilience and efficiency in the Yellow River Basin

ZHOU Cheng[1], ZHAO Yaling[1], ZHANG Xuhong[2], ZHOU Lin[3], REN Minmin[1]

(1. Faculty of Culture, Tourism, Journalism and Art, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, Shanxi, China; 2. School of Economic and Management, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, Shannxi, China; 3. Tourism College, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Improving urban ecological resilience and efficiency, and promoting coordinated development between these two systems are the primary objectives of ecological governance in the Yellow River Basin, China. Considering 57 cities in the Yellow River Basin as the research target, this study analyzed the spatial and temporal evolutionary characteristics of urban ecological resilience and efficiency based on the weighted summation method and the slacks-based measurement (SBM) model for the period from 2009 to 2018. Furthermore, a coupled coordination model was employed to analyze the coordinated development of urban ecological resilience and efficiency in cities along the Yellow River Basin. The study results showed the following: (1) During the study period, the urban ecological resilience of cities along the Yellow River Basin had a fluctuating declining trend overall, and these cities faced greater ecological threats and environmental pressures. Xi'an, Zhengzhou, and Jinan City are three provincial capitals that show high urban ecological resilience, whereas Guyuan, Dingxi, Haidong, and Lüliang City showed low urban ecological resilience. (2) The urban ecological efficiency of cities along the Yellow River Basin was generally characterized by a "U"-shaped evolution; in other words, the efficiency first decreased and subsequently increased. Dingxi, Longnan, Qingyang, Ordos, Guyuan, and Luoyang City showed a high level of urban ecological efficiency, while cities with low urban ecological efficiency were mainly located in Shanxi, Henan, and Shandong provinces in the middle and lower reaches of the Yellow River. (3) The coordination relationship between ecological resilience and efficiency is similar to that of the ecological efficiency subsystem, which changed from a continuous decline to a gradual recovery. During the study period, the number of cities with good and moderate coordination between urban ecological resilience and efficiency increased, while the number of cities with poor coordination decreased. Furthermore, while the coordinated development momentum of ecological resilience and efficiency of cities in the basin is apparent, the contradiction between economic development and environmental protection continues to be prominent in the short term. Thus, results of this study contribute to the knowledge base regarding the formulation of ecological policies, improvement of urban ecological resilience, and promotion of urban ecological efficiency in cities in the Yellow River Basin.

Key words: ecological resilience; ecological efficiency; coordinated development; urban; Yellow River Basin